

話 題

J-PARC 3 GeV RCS のビームコミッショニング

發知 英明*

Beam Commissioning of the J-PARC 3 GeV RCS

Hideaki HOTCHI*

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が、茨城県東海村に共同で建設している大強度陽子加速器施設であり、400 MeV リニアック、速い繰り返しの 3 GeV シンクロトロン (RCS; Rapid Cycling Synchrotron)、及び、50 GeV シンクロトロン (MR; Main Ring) の 3 基の加速器群から構成される¹⁾。J-PARC 第 1 段加速器であるリニアックは、2006 年 11 月よりビーム試験を開始し、2007 年 1 月 24 日に当初の所期エネルギー 181 MeV の加速に成功した²⁾ (将来、リニアックは、Annular Coupled Structure セクションを追加し、400 MeV へ増強の予定)。2007 年 6 月迄、リニアック単独のビーム試験が継続され、その後は、7 月から 8 月の夏期シャットダウンを挟み、2007 年 9 月より、J-PARC 第 2 段加速器である RCS を含めたビームコミッショニングが開始された。RCS 主体のビーム試験は、2008 年 2 月迄継続され、2008 年 5 月より、MR を含むビームコミッショニングが開始される予定である。

本報告では、2007 年 9 月から 2008 年 2 月にかけて実施された RCS の第一ステージのビームコミッショニングに焦点を絞り、ビーム試験の進捗状況を紹介する。

1. 序 論

RCS は、ミュオン生成標的及び中性子生成標的へのビーム供給と、MR の入射器という 2 つの役割を担っている。RCS では、25 Hz という速い繰り返しの陽子を 400 MeV から 3 GeV へと加速し、最終的には 1 MW という大出力運転の実現を目指している。但し、当初の入射エネルギーは 181 MeV であり、そ

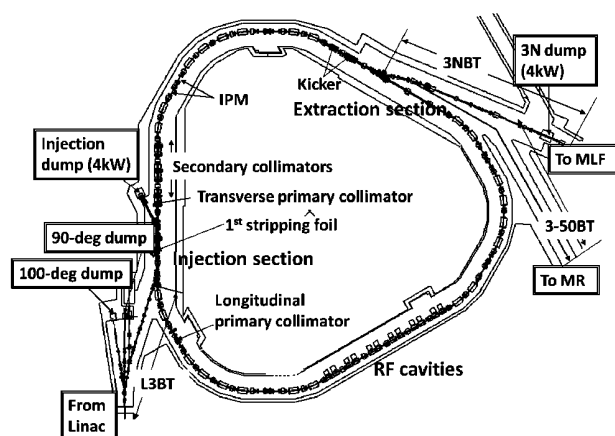


図 1 J-PARC 3 GeV RCS 機器配置図

の低い入射エネルギーに対し、0.3 MW の出力を実現することが、我々の当面の目標となっている。図 1 に示すように、RCS は、周長 348.333 m の 3 回対称のラティス構造を持つ。各 super-period は、2 つの 3-DOFO アークモジュールと dispersion-free の 3-DOFO 直線モジュールから成立つ。各アークモジュールには missing-bend cell を作り、水平成分に約 5 m の分散を発生させ、その位置に色収差補正用の 6 極電磁石や縦方向コリメータを設置している。また、このラティス構造は、トランジションエネルギーを 9.14 GeV へと押し上げ、加速過程の縦方向の制御を容易にしている。入射機器³⁾・横方向コリメータ⁴⁾、出射機器³⁾、及び、加速空洞⁵⁾については、それぞれ、分散の無い 3 箇所の直線モジュールに配置されている。

RCS のような大強度加速器では、空間電荷効果が、最終的に到達可能なビーム強度に強い制限を与える。即ち、空間電荷効果それ自身や、空間電荷と周期

* 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター J-PARC, JAEA
(E-mail: hideaki.hotchi@j-parc.jp)

的な外場とが絡み合って生じる様々な共鳴現象が、エミッタンスの増大やビーム損失の原因となる。このような効果を出る限り緩和する為に、RCSでは、横・縦両方向に対しペイント入射を行う。これは、位相平面の広い範囲に出来る限り一様に粒子を分布し、空間電荷密度を抑える手法であるが、一方で、横・縦方向に振幅の大きい粒子が増え、その非線形な振る舞いが問題になる可能性もある。このように、ペイント入射には色々な効果が絡み合う。また、横方向のペイント入射を例に挙げると、波形の選択や、Correlated・Anti-correlated等、ペイントの方法も多様で、調整には、研究的な要素も多分に含まれる。また、生じたビーム損失をしっかりと局所化することも重要な課題となる。RCSでは、 216π mm mradのペイントエミッタンス、 324π mm mradの横方向コリメータアクセプタンス、 $\pm 1\%$ の運動量広がりに対し、 486π mm mradのフィジカルアパーチャを確保している。高コリメーション効率を得る為に、十分なアクセプタンスを確保することは重要であるが、一方で、大口徑電磁石群によってもたらされる不利益も存在する。特に、RCSのようなコンパクトなマシンでは、どうしても磁石の磁極長に対する口径の比率が大きくなってしまふ。こうした場合、有意なフリンジ磁場が発生し、その非線形性の影響が無視できなくなる⁶⁾。即ち、誘起された非線形共鳴に空間電荷の影響も加わり、チューンダイアグラム上のフレキシビリティに強い制限が課せられる可能性がある。このように、様々な効果が絡み合う複雑なマシンを調整するには、まずは、不要なビーム損失を避けるという点からも当然であるが、空間電荷の影響の少ない低電流のビームを使用し、光学系やビームの単粒子的振る舞いをしっかりと押えることが第一歩となる。その後は、徐々にビーム電流を上げていき、各効果の電流依存性を調べ、その都度、最適なパラメータを探索するといった地道な調整が必要になる。

2. ビーム試験概要

RCSのビーム試験は、2007年9月より開始された。基本的には、2週間のビーム試験期間と2週間のビーム停止期間からなる4週間を1サイクルとし、2008年2月末迄の計6サイクルでRCSの第一ステージの調整試験を実施した。この間のビーム試験で利用可能なビームダンプは、入射ダンプ、及び、RCS出射部のすぐ下流の3NBT(3 GeV-RCS-to-Neutron-target Beam Transport)にある3Nダンプの2箇所であった。ダンプの許容量は共に4 kWである。

表1 ビーム試験期間中の典型的な入射ビーム条件(5段目は設計値)

Energy (MeV)	Peak current (mA)	Macro-pulse length (msec)	Medium-pulse length (nsec)	Particles per bunch
181	5	0.05	560	4.2×10^{11}
181	25	0.05	112	4.2×10^{11}
181	25	0.05	560	2.1×10^{12}
181	25	0.10	560	4.2×10^{12}
400	50	0.50	560	4.2×10^{13}

表1に、このビーム試験期間中の典型的な入射ビーム条件を示す。リニアックのマクロパルスは、RCSの入射時の周回周波数約1 MHzと同期した中間パルス構造を持つ。RCSへ入射するビームの強度は、基本的には、リニアックビームのピーク電流とマクロパルス長の組み合わせにより調整された。また、必要に応じ、中間パルス長により、RCS周回ビームの運動量広がりが調整された。

初期のビーム調整では、不要なビーム損失を避ける為に、バンチあたりの粒子数は 4.2×10^{11} という設計値の1%程度の低電流ビームが使用された。光学系の測定や補正等の基本調整や、アパーチャサーベイ・ベータatron共鳴サーベイ等の基本データの収集等も、空間電荷効果の少ないこうした低電流ビームを使用して実施された。また、RCSは、 $h=2$ の2バンチが設計運転であるが、やはり、不要なビーム損失を避けるという理由で、この期間のビーム試験の殆どは、 $h=2$ の1バンチで実施された。基本調整終了後は、必要に応じ、デザインの5%、10%というようにバンチあたりの粒子数を増やしていった。

また、ビームの繰り返しであるが、初期ビーム調整の殆どは、シングルショットで実施された。一発のビームを入射し、そのデータ解析を行う。速い時で10分、遅い時は1時間以上も次の一発を入射するのに時間をかけることもあったが、リニアックからの入射ビームの軌道、エネルギーが共に十分安定していたので、こうした効率の良いビーム調整が実現した。初期調整終了後は、必要に応じ、1 Hz、8.33 Hz、25 Hzと順次繰返しを上げていった。

また、入射手法であるが、この第一ステージのビーム試験期間中は、複雑なペイント入射は行わず、中心入射で加速器全般の基本調整、基礎データの収集を行った。

2007年9月の最初のラン(Run#9)で、入射軌道及び入射ダンプラインの調整を行い、次の10月のラ

ン (Run#10) で、入射エネルギー 181 MeV での周回と、3 GeV 加速試験を実施した。まず、10月26日に181 MeV での周回調整を開始した。1台の4極電磁石が逆極性であったというアクシデントはあったが、シミュレーション等により直ぐにそれに気づき、時間を浪費すること無く、その日の内に周回達成となった。続いて、翌週の10月31日に所期エネルギー3 GeV への加速及び取り出しに成功した。図2が3 GeV 加速達成時の記念写真である。3 GeV 加速達成後は、11月及び12月に予定していた施設検査に合格することが我々の主課題となった。まず、11月のラン (Run#11) で3 GeV 加速時の施設検査、12月のラン (Run#12) で入射ダンプの施設検査を、それぞれ受験し、12月25日にめでたく合格通知を受領することができた。施設検査を2007年内に通過するという大目標を掲げて、ビーム試験に臨んでいたわけであるが、予定通り、その目標を達成することができた。2007年中の4ラン (Run#9 から Run#12) は、施設検査という予定に追われ、殆ど十分な試験調整が出来ずにいたが、2008年の1月 (Run#13) 及び2月 (Run#14) の2ランで、その遅れを取り戻すべく、本格的な RCS の調整試験を開始した。

RCS のビーム試験は、以下に示す4つの運転モードから構成される。

- (1) 入射ダンプモード (行先: 入射ダンプ)
- (2) 1/3 周モード (行先: 3N ダンプ)
- (3) 181 MeV 周回モード (行先: 3N ダンプ)
- (4) 3 GeV 加速モード (行先: 3N ダンプ)

(1)の入射ダンプモードでは、リニアックで181 MeV に加速されたビームを直接入射ダンプに導き、入射軌道及び入射ダンプ軌道の調整を行った。(2)の1/3周



図2 3 GeV 加速達成時の記念写真

モードでは、ビーム入射後、RCS の1/3周を回ったところで直ちにビームを取り出し、3N ダンプへビームを導いた。このモードでは、大まかに主電磁石の磁場強度と入射エネルギーのマッチングを確認したのみで、様々な周回系のパラメータ調整は、次に述べる周回モードで行った。(3)の181 MeV 周回モードでは、RCS は、加速無し of ストレージリングのように運転された。(1)から(3)の運転モードでは、入射パンプ電磁石を除き、RCS の電磁石系は、入射エネルギー181 MeV に合わせ DC 励磁された。この181 MeV 周回モードでしっかりと光学系等の基本調整を行い、(4)の3 GeV 加速モードへ移行した。次章では、各運転モードでの調整試験の結果を、実際の調整シナリオの順に紹介する。

3. 入射ダンプモード・1/3周モード

RCS の入射部には、荷電変換用の炭素膜が用途別に3枚設置されている。第1の荷電変換膜は、リニアックで加速された H^- ビームを陽子へ荷電変換し、RCS へビームを入射する為に使用される。第2・第3の荷電変換膜は、第1荷電変換膜で荷電変換し損なった H^0 と H^- をそれぞれ陽子へと荷電変換し入射ダンプへ導くために使用される。入射ダンプモードでは、第1荷電変換膜を退避し、リニアックで181 MeV に加速されたビームを直接入射ダンプへ導き、

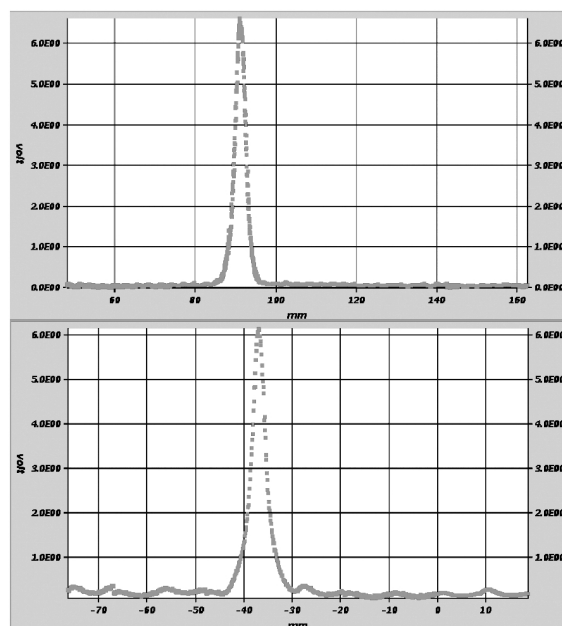


図3 第1荷電変換膜近傍に設置されたMWPMで測定した入射ビームのプロファイル。ワイヤーアングルは、水平に対し107.7° (上図)、17.7° (下図)

入射軌道及び入射ダンプラインの調整を実施した．入射部には，2 台の BPM，及び，6 台の MWPM (Multi-Wire Profile Monitor) が設置されている．図 3 に第 1 荷電変換膜近傍に設置されている MWPM で測定した入射ビームのプロファイルを示す．このような，ビーム軌道位置データを使用し，入射バンプの軌道を中心入射の設計軌道へと合わせ込んだ．

入射軌道調整後は，運転モードを 1/3 周モードへ切り替え，RCS 周回の 1/3 にビームを通した．この運転モードでは，入射ビームのエネルギーと主電磁石の磁場強度のマッチングを大雑把に確認したのみで，周回系のパラメータ調整は，主として，次に示す 181 MeV 周回モードで実施された．

4. 181 MeV 周回モード

181 MeV 周回モードでは，RCS は，加速無しのレストランリングのような運転がなされた．この運転モードで光学系等の基本調整を行い，次の 3 GeV 加速モードへ移行するといった方針を取った為，ビーム試験期間の半分以上が，この運転モードでの調整試験に充てられた．

4.1 運転パラメータ調整

以下に，181 MeV 周回モードでのビーム調整手順を示す．

- (1) 偏向電磁石と入射エネルギーのマッチング
 - (2) 周回周波数測定
 - (3) RF 捕獲調整 (Stationary)
 - (4) ベータトロンチューンの粗調整
 - (5) COD 補正
 - (6) 光学系の測定，及び，補正
 - (7) 色収差の測定，及び，補正
 - (8) 入射軌道と周回閉軌道のマッチング
- (1)及び(2)は，RF 捕獲無しでの調整・測定になる．

まずは，偏向電磁石と入射エネルギーのマッチング調整であるが，我々は，分散による閉軌道の変位量を観測し，偏向電磁石の磁場強度を調整した．このマッチング調整に引き続き，周回周波数測定及び RF 捕獲の調整を行った．RF 捕獲後は，ベータトロンチューンの粗調整，COD 補正と調整を進めた．図 4 に，周回部に設置された 54 台の BPM で測定した閉軌道を示す．図に示されるように，補正前の COD は，10 mm 程度存在したが，周回部に設置した 52 台の補正電磁石により，現状 2 mm 程度にまで補正出来ている．この COD 補正は，モデル計算から求めた応答行列を使用して実施されたが，数回の反復により，この程度の補正を実現することが出来た．

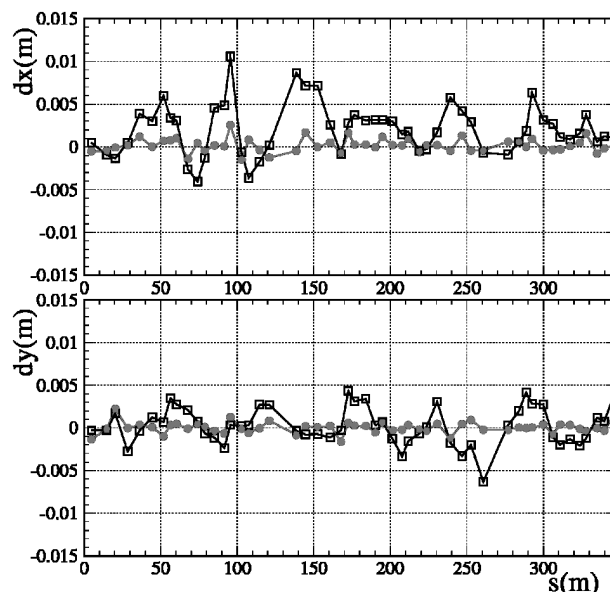


図 4 181 MeV 周回モードで測定した閉軌道．□が補正前，●が補正後

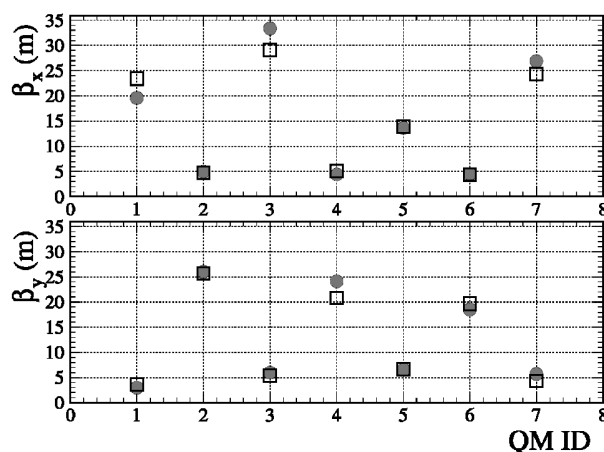


図 5 181 MeV 周回モードで測定した各 4 極電磁石ファミリーの平均のベータ関数 (補正前)．●が測定結果，□が設計値

COD 補正に引き続き，我々は，ベータ関数，分散関数等，一連の光学系の測定を実施した．RCS の収束系は，7 ファミリーの 4 極電磁石から構成される．図 5 に示すように，我々は，各 4 極電磁石ファミリーの K_1 値とベータトロンチューンの相関関係を観測し，各ファミリーの平均のベータ関数を導出した．ベータ関数に関しては，別の手法での測定も実施した．RCS では，補正電磁石のギャップ中に BPM が設置されており，その BPM と補正電磁石間の位相差は 0 と見なすことができる．この関係を利用すると，ベータ関数と，測定量である補正電磁石の蹴り角に対する

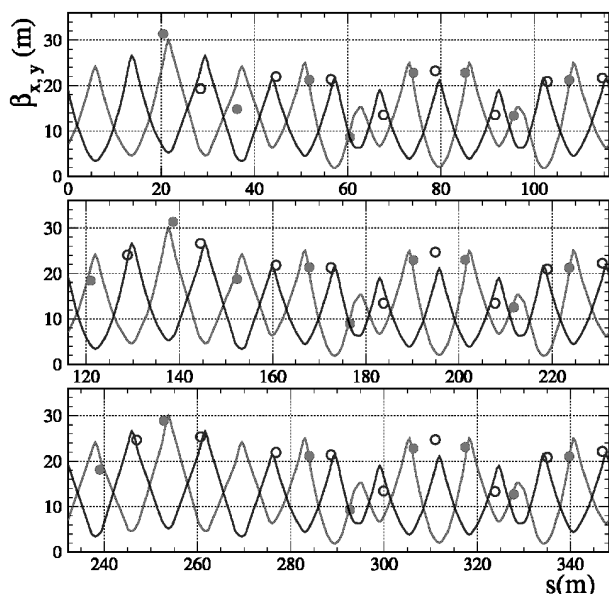


図6 181 MeV 周回モードで測定したベータ関数 (補正前). ●が水平, ○が鉛直ベータ関数の測定結果, 実線が設計値

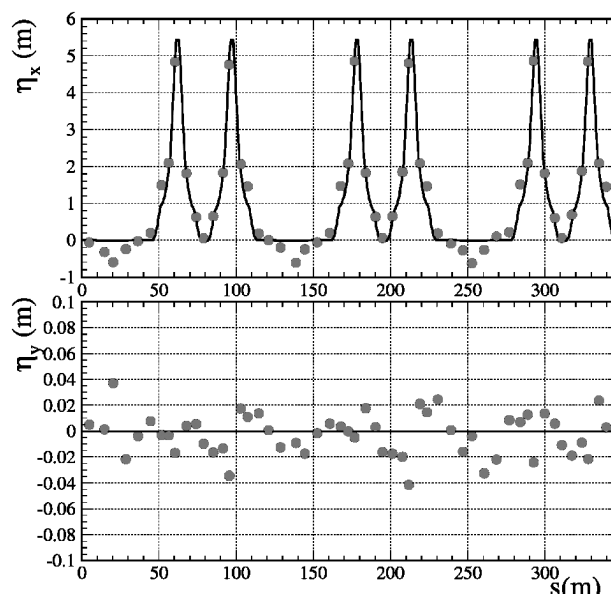


図8 181 MeV 周回モードで測定した分散関数 (補正前). 実線は設計値

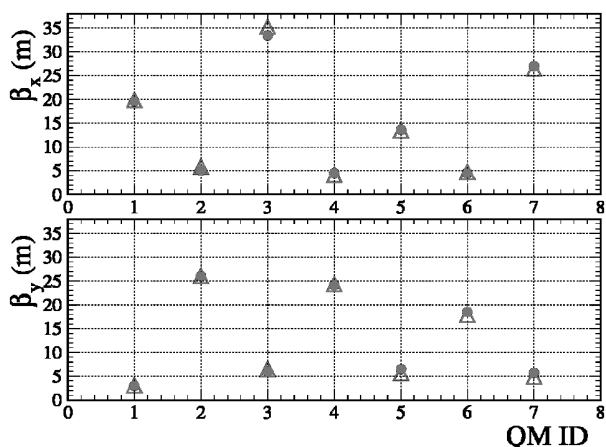


図7 図5 (●) と図6 (△) の測定結果の比較

閉軌道の応答 ($\Delta x/\Delta\theta$) は, $\beta_x = 2(\sin \pi Q_x/\cos \pi Q_x) \times (\Delta x/\Delta\theta)$ という簡単な式で結び付く. 図6に, この関係式を利用し, 導出した各補正電磁石位置でのベータ関数を示す. 先に示した結果と同様に, 最初の測定では, ベータ関数は, 設計値から若干ずれていた. 但し, 図7に示すように, 2つの異なった手法によるベータ関数の測定結果は良く一致しており, 十分な精度で測定できたことが確認された.

図8に, RF周波数に対する閉軌道の応答から導出した分散関数の測定結果を示す. RCSの分散関数は, 鉛直方向は0, 水平方向は, アーク部の missing-bend cell の位置に約5 mの分散の山が発生し, 長直

線モジュールの分散は0となるように設計されている. しかしながら, 最初の測定では, 長直線部にも0.8 m程度の分散が発生していた.

上述のように, 調整開始時の光学系は, 設計値から若干ずれていた. これは, 4極電磁石の設定誤差(電流-磁場の関係式の誤差)に由来する. 次の課題は, 光学系の補正ということになるが, 我々は, 以上のチューン, ベータ, 分散の測定結果を, モデル計算の中で統一的に再構築し, そのモデルから各4極電磁石の補正量を導出した. 図9と図10に, 補正後のベータ関数及び分散関数の測定結果を示す. 図に示される通り, ただ一回の測定・補正のループにより, ほぼ, 設計通りの光学系を構築することに成功した.

光学系補正後, 次に, 我々は, 色収差の測定, 及び, 補正を試みた. 上述の分散関数の測定と同様に, RF周波数をノブにし, チューンの変位量から色収差を導出した. 図11に測定結果を示す. 補正前のRCSの色収差の測定結果は, 水平成分が-10.3, 鉛直成分が-7.2であった. この測定結果に対し, RCSの偏向電磁石及び4極電磁石の多極磁場成分に関する測定結果を考慮した我々のモデル計算の結果は, 水平/鉛直成分, それぞれ, -10.4/-6.8となり, 測定結果とよく一致した. 一方, 単純な線形ラティスから計算した色収差は, 水平/鉛直成分, それぞれ, -8.5/-8.1となり, 上記の測定結果と上手く一致しない. 序論で述べたように, RCSのような, 大口径電磁石群から構成される加速器では, 磁場の非線形性, 特

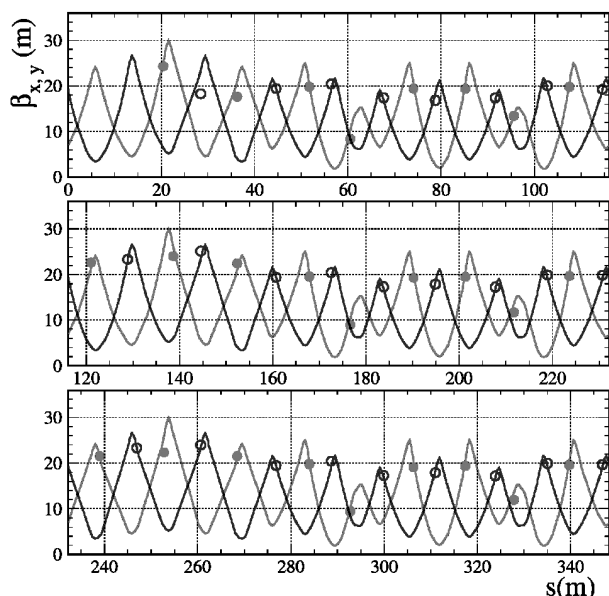


図9 181 MeV 周回モードで測定したベータ関数 (補正後). ●が水平, ○が鉛直ベータ関数の測定結果, 実線が設計値

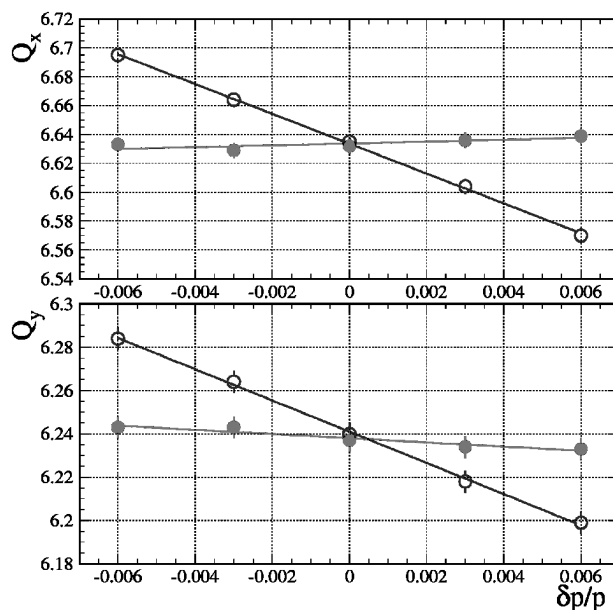


図11 181 MeV 周回モードで測定した色収差. ○が補正前, ●が補正後

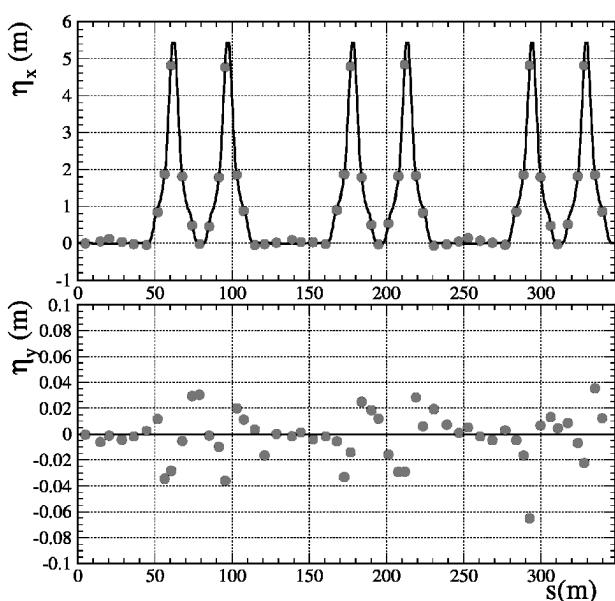


図10 181 MeV 周回モードで測定した分散関数 (補正後). 実線は設計値

に, フリンジ磁場の非線形性が有意であることをよく示している. この色収差は, 3ファミリーの6極電磁石により補正された. その際, 各6極電磁石の励磁量は, モデル計算の応答を使い導出された. 図11に補正後の測定結果も合わせて表示しているが, 一回の測定・補正のループにより, ほぼ, 十分な補正が達成できた.

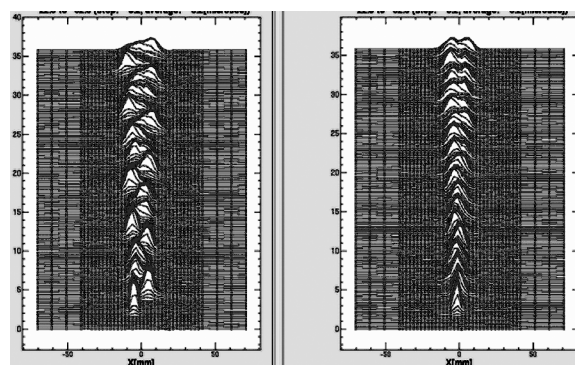


図12 181 MeV 周回モードで IPM により測定された入射近傍のビームプロファイルマウンテンプロット (水平成分). 左図が入射軌道と周回閉軌道のマッチング調整前, 右図が調整後

以上の(1)から(7)の手順で, 光学系の調整が完了となる. 次に, 我々は, 入射軌道と周回閉軌道のマッチング調整を行った. 図12に, RCSのアーケ部に設置された残留ガスプロファイルモニタ (IPM) により測定された水平成分のビームプロファイルマウンテンプロットを示す. 本調整では, 中間パルス一発のみを入射して, 入射軌道と閉軌道間のミスマッチにより生じるベータトロン振動を観測し, その振動を最小化するように, 第1荷電変換膜上の軌道の位置と傾きを調整した. 鉛直方向についても同様の手法で, マッチング調整を実施した.

以上の手順により, RCSの基本パラメータの調整

を行った。その後は、フィジカルアパーチャサーベイ、入射ラインや出射ラインからの漏れ磁場の影響、ベータトロン共鳴サーベイ等の基礎データの収集を行った。

4.2 フィジカルアパーチャサーベイ

上述の入射軌道と閉軌道のマッチング調整後、今度は、このマッチング条件を故意にずらし、周回ビームのエミッタンスとビーム損失の関係を調査した。今回の調査では、入射バンプ電磁石をノブにして、第1荷電変換膜上で、入射ビームと閉軌道の間に水平方向の位置オフセットを作ることで、水平方向のビームエミッタンスを動かした。図13に、位置オフセットとエミッタンスの関係を示す計算結果(上図)、及び、位置オフセットとビーム損失の関係を示す測定結果(下図)を示す。図に示される通り、コリメータアクセプタンス(324 π mm mrad)の内側では、ビーム損失はほぼ平坦で、その境界を過ぎたところから急激にビーム損失が増加するといった比較的素直な結果である。但し、コリメータアクセプタンスの内側にも数%程度のビーム損失がオフセット的に存在する。現状の

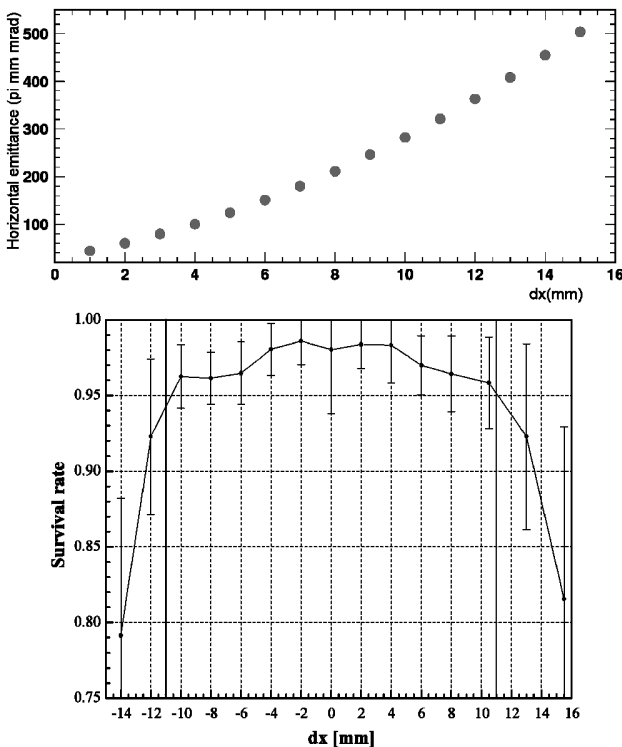


図13 上図は、第1荷電変換フォイル点での入射軌道と閉軌道間の位置オフセットとエミッタンス(水平方向)の関係を示す計算結果。下図は、181 MeV周回モードで測定した位置オフセットとビーム損失の関係。図中の黒線がコリメータアクセプタンス324 π mm mradに相当する

入射手法では、ビームと第1荷電変換膜との衝突回数は、入射期間中100回程度となる(設計通りのペイント入射を実施した場合は20回程度)。この荷電変換膜による散乱が原因となるビーム損失は1%程度と評価されているが、数%という測定結果を説明できない。入射ビームのハローや周回過程でのハロー形成等、原因は色々と考えられるが、今後は、チューンとの関係や、リニアックとRCSを結ぶビームトランスポートにあるコリメータをノブにした系統的な試験を行い、その起源を理解したいと考えている。また、今回の測定では、水平方向の位置(x)のみをノブにしたが、傾き(x')や鉛直成分(y, y')をノブにした測定も実施したいと考えている。

4.3 入射部からの漏れ磁場の影響

次に、入射部及び出射部からの漏れ磁場の影響について説明する。5章の図17に、3 GeV加速モードで観測したCODが示されているが、水平成分のCOD(補正前)が加速に従い減少している。この現象は、入射ラインや出射ラインに設置したDC電磁石の磁場が、RCSの周回部に漏れ込んでいることを意味する。この結果に対し、我々は、181 MeV周回モードにおいて、出射セプタム、3NBT電磁石、及び、入射ダンブセプタムからのDC的な漏れ磁場が作り出すCODを観測し、漏れ磁場の値を定量評価した。図14が、出射セプタムからの漏れ磁場が作るCODの測定結果である。この結果は、出射セプタム通電時と無

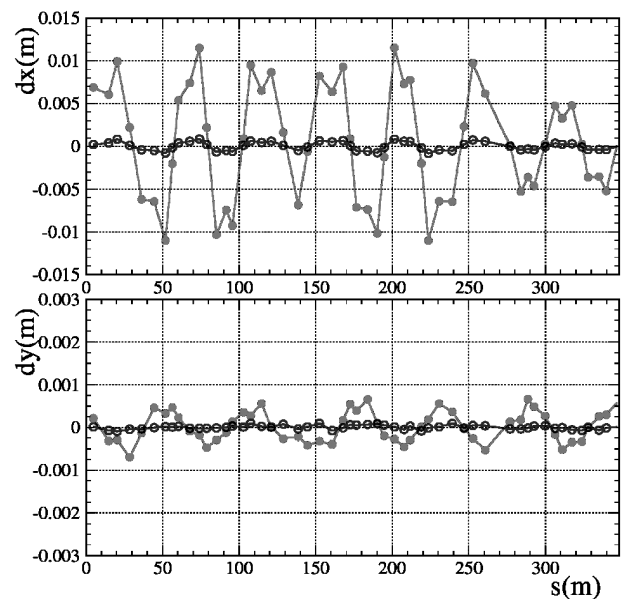


図14 181 MeV周回モードで測定した出射セプタムからの漏れ磁場が作るCOD。●が出射セプタムを3 GeV通電した場合、○が181 MeV通電時

通電時にそれぞれ測定した COD の差分に相当する。図に示されるように、181 MeV 通電時に発生する COD は小さいが、3 GeV 通電時には、水平方向に 12 mm、鉛直成分に 1 mm 程度の COD が発生する。また、3NBT 電磁石に関して、同様に、3 GeV 通電時の影響が強く、水平方向に 8 mm、鉛直方向に 1.5 mm 程度の COD が発生する。一方、通常 181 MeV で励磁する入射ダンプセプトムからの COD は、1 mm 程度と予想通り少なかった。この測定結果より導出された出射部からの漏れ磁場は、 $15 \times 10^{-3} \text{ Tm}$ (出射セプトム)、 $20 \times 10^{-3} \text{ Tm}$ (3NBT 電磁石) 程度となり、3 GeV 加速モードに移行した際、入射エネルギー領域で周回ビームに大きな影響を及ぼすことになる。漏れ磁場により発生する COD は、周回部の補正電磁石により補正可能であるので大きな問題にはならない。但し、漏れ磁場には、一般に、有意な K_1 成分も存在する。また、今回の測定結果では、鉛直方向にも COD が発生しているため、 K_1 のねじれ成分も存在する可能性がある。出射部近傍に、 K_1 や skew- K_1 成分を持つ誤差磁場が存在した場合、RCS の 3 回対称性が崩れる効果や、半整数共鳴・線形結合共鳴等の影響が懸念される。

4.4 ベータトロン共鳴サーベイ

上述の出射部からの漏れ磁場の影響や、オペレーティングポイントの探索の為に、我々は、181 MeV 周回モードにおいて、ベータトロン共鳴の調査を行った。図 15 にオペレーティングポイント近傍のチューンダイアグラム、図 16 にチューンサーベイの観測結果をそれぞれ示す。本測定は、COD や色収差を補正した条件下で、また、空間電荷の影響が少ない低電流ビーム (パンチあたりの粒子数 4.2×10^{11}) を使用し実施された。図中の○データが出射部の DC 電磁石を 181 MeV 通電した際の測定、一方の□データが 3 GeV 通電時の測定結果になる。図に示されるように、様々な共鳴が観測された。半整数共鳴 $2Q_{x,y} = 13$ 、線形結合和共鳴 $Q_x + Q_y = 13$ や色収差補正用の 6 極電磁石に由来する 3 次構造共鳴 $Q_x - 2Q_y = -6$ 等、観測に掛った殆どは、想定内の共鳴であった。唯一の例外が、 $Q_y = 6.2$ 近傍に観測された大きな落ち込みである。この落ち込みに関し、最初は、出射部からの漏れ磁場に起源を求めたが、漏れ磁場の影響が小さい場合でも大きな落ち込みが観測されている。 $Q_y = 6.2$ 近傍で生じるビーム損失は極めて速く、入射後、数 msec 以内に、大部分の粒子が鉛直方向の制限に掛り損失する。また、測定結果より、出射部からの漏れ磁場が、半整数共鳴 $2Q_{x,y} = 13$ や線形結合和共鳴 $Q_x +$

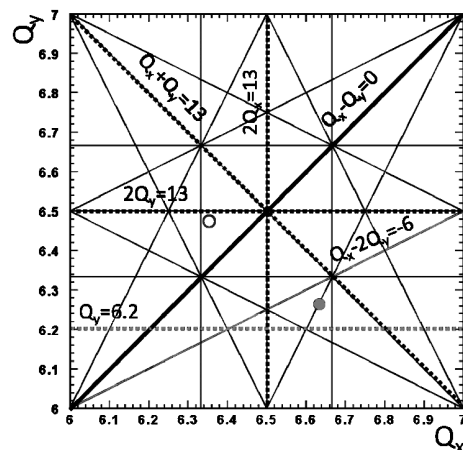


図 15 チューンダイアグラム。●が設計点

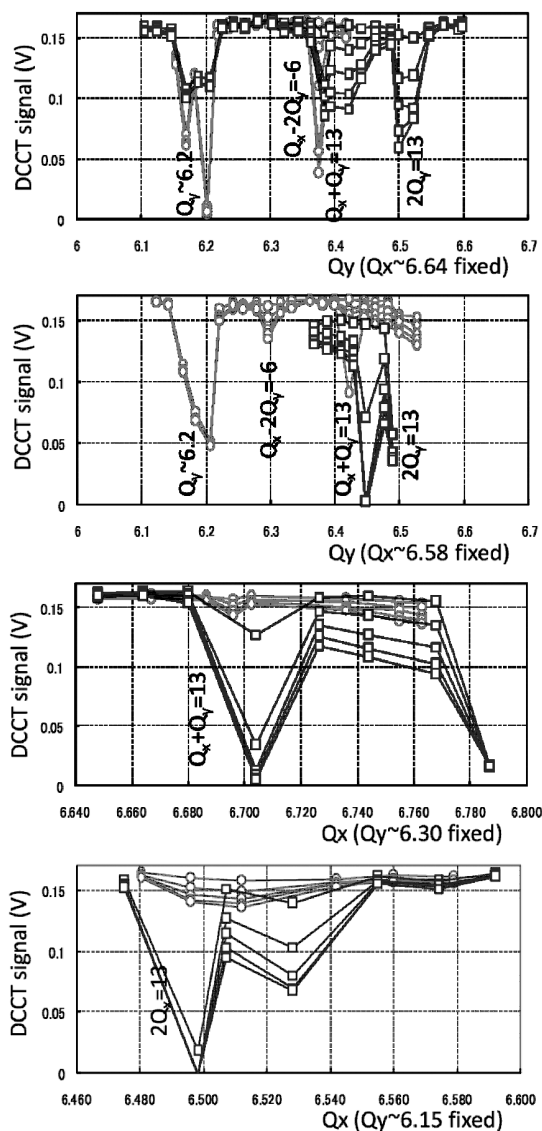


図 16 181 MeV 周回モードでのチューンサーベイの結果。○が出射部 DC 電磁石を 181 MeV 通電した場合、□が 3 GeV 通電時の結果

$Q_y = 13$ を強く励起している様子も確認された。4.3 に述べたように、漏れ磁場内には、 K_1 成分だけでなく、有意な skew- K_1 成分も存在しているように思われる。出射部からの漏れ磁場については、磁気遮蔽の強化が望まれるが、本年7月から8月の夏期シャットダウン期間に対策を講じるべく、現在、具体案の検討が進められている。

5. 3 GeV 加速モード

我々は、181 MeV 周回モードでの調整結果を維持するように、3 GeV 加速用パターンの初期値を作り、3 GeV 加速モードへと移行した。

5.1 運転パラメータ調整

以下に、3 GeV 加速モードでの調整手順を示す。

- (1) 偏向電磁石パターンのボトム（入射）と入射エネルギーのマッチング
- (2) 加速パターンボトムのチューン調整
- (3) RF 周波数パターンの補正
- (4) COD 補正
- (5) 加速パターンボトムのベータ関数測定（周回モードの測定結果との整合性確認）
- (6) 加速過程のチューン測定、偏向電磁石及び4極電磁石間のトラッキング調整
- (7) 加速過程の分散、色収差測定
- (8) 入射軌道と周回閉軌道のマッチング確認

まずは、偏向電磁石パターンのボトムと入射エネルギーのマッチング調整であるが、我々は、181 MeV 周回モードで測定した周回周波数を再現するように、磁場パターンのボトムを調整した。

次に、加速パターンボトムでのチューン調整であるが、パターン設定の誤差により、若干ではあるが、181 MeV 周回モードで調整した値からずれていた。このずれを、直線部の3ファミリーの4極電磁石により補正した。この3ファミリーの4極電磁石は、分散や入射軌道に関わらないという観点から選択され、ベータ関数の分布を大きく変えないよう制限をつけて、磁場パターンのボトムが微調された。

次のRF周波数パターンの調整では、加速パターンボトムの周波数は、181 MeV 周回モードで決定した値に固定され、それ以降の周波数パターンに対し補正を与えた。各加速過程の補正量は、約4 mの分散（水平方向）を持つ位置に設置されたBPMの位置データから導出された。偏向電磁石の磁場とRF周波数は非常に安定していたので、この調整後は、軌道フィードバックなしで、安定に加速することが出来た。

次に加速過程のCOD補正を説明する。前章で述べ

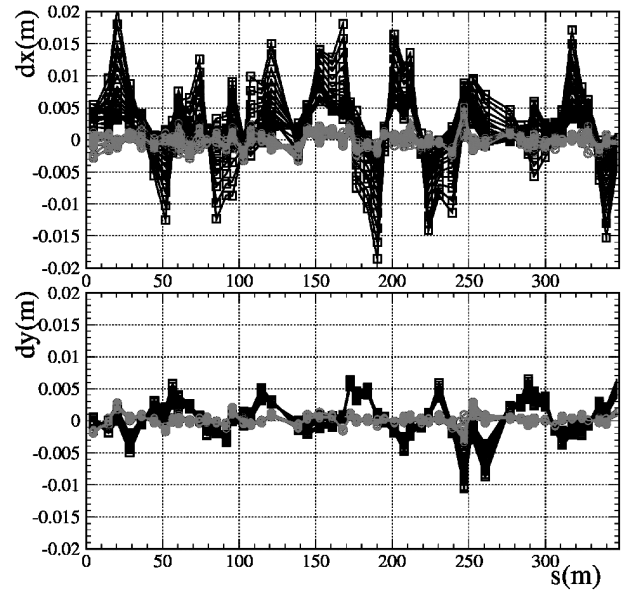


図17 3 GeV 加速モードで測定した加速過程20点のCOD. □が補正電磁石による補正前、●が補正後

たように、我々は、181 MeV 周回モードにおいて、色々なソースがもたらすCOD、即ち、DC的漏れ磁場を作るCOD（加速に従い時間変動するCOD）や、周回部の磁場誤差や設置誤差等によるCOD（加速中一定）を、それぞれ分離して測定した。我々は、その測定結果より、補正電磁石の3 GeV 加速用の磁場パターンを作り、調整手順の最初から、大雑把な加速過程のCOD補正を実施していた。こうした状況を作り、まず、RF周波数補正により、運動量ミスマッチによる閉軌道の変動を最小化し、その後、残ったCODを補正電磁石で補正した。このような手順により、横方向と縦方向の効果を切り分けて、閉軌道の調整を行った。図17に補正電磁石による補正前後のCODを示す。

閉軌道調整後、加速パターンボトムで、各4極電磁石ファミリーの平均のベータ関数の測定を行った。図18に示されるように、181 MeV 周回モードでの調整結果と良く一致しており、加速パターンボトムの光学系の整合性が確認された。

図19に、加速過程のベータatronチューンの測定結果を示す。これは、偏向電磁石と4極電磁石間の磁場パターンのトラッキング精度を反映する。図中の△のデータが調整前の測定結果で、この場合の加速中の変動は、水平チューンで0.1、鉛直チューンで0.05程度であった。この初期データに対し、4極電磁石の磁場パターンのトップ（出射）を調整したものが、図

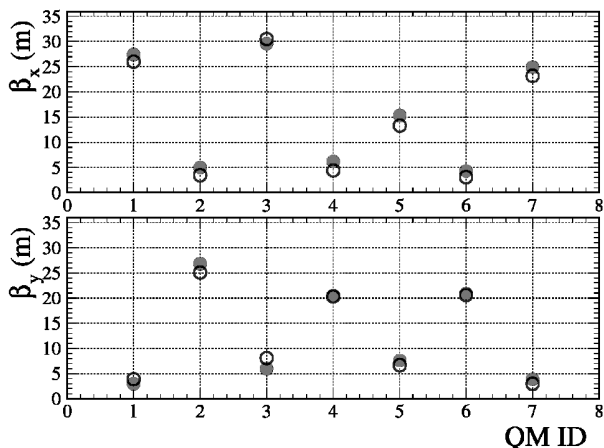


図18 加速パターンボトムで測定した各4極電磁石ファミリーの平均のベータ関数 (○). ●は181 MeV 周回モードでの測定結果

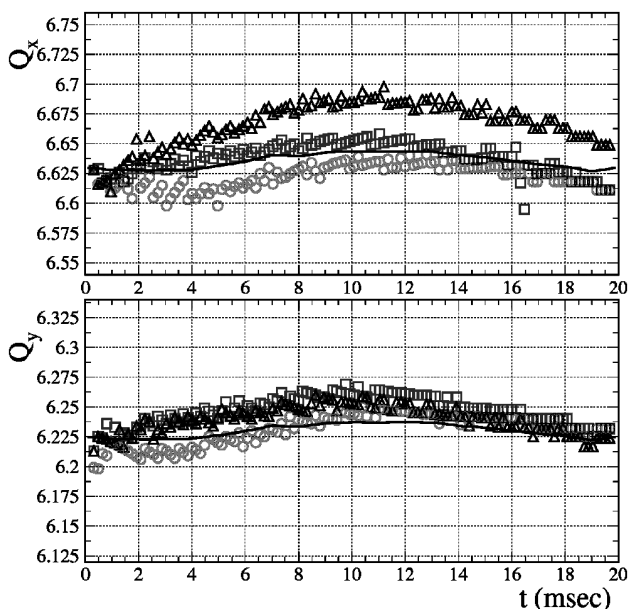


図19 加速中のチューン変動

中の□のデータになる. 更に, 偏向電磁石と4極電磁石間の位相を調整した結果が○のデータで, チューン変動は, 水平・鉛直方向共に, 0.05程度となった. 図中の実線は, 偏向電磁石の磁場パターン (RFの周波数補正結果より推定) と4極電磁石の磁場パターン(磁場測定結果)から計算した加速過程のチューン変動に相当する. 偏向電磁石と4極電磁石の磁場パターンは共に, 高調波成分を用い, 正弦波に合わせ込まれる予定であったが, 偏向電磁石については, 電源容量の制限の為に, パターン補正が十分に出来ず, 現状, 正弦波から若干ずれている. この計算結果の変動は, この不整合に由来するものである. チューン変

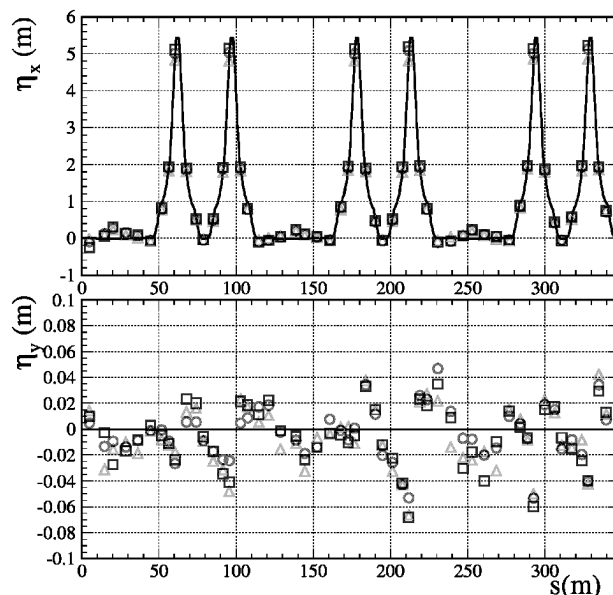


図20 加速過程12 msec (○), 15 msec (□), 18 msec (△)の分散関数. 実線は設計値

動の測定結果は, 依然, 計算結果に比べ2倍程度の隔たりがあるが, 現状は, この状態でビーム試験を進めている. トラッキングに関しては, 今後, 加速過程のベータ関数を測定し, 定量評価したいと考えている. 将来, ビーム電流を上げて行く際には, 加速過程のチューンの制御が大きな鍵を握るので⁷⁾, トラッキングの定量評価は, 直近の大きな課題の一つである.

図20に加速過程の分散関数の測定結果を示す. 図中には, 加速中盤の12 msec, 15 msec, 及び, 出射直前の18 msecの測定結果が示されているが, 設計値とほぼ一致しており, 加速過程で, 光学系が大きく崩れていないことが確認された.

次に加速過程の色収差測定である. 最終設計では, 色収差補正用の6極電磁石も加速に合わせ AC 通電する予定であるが, 現状は, DC 電源で励磁しており, 色収差は, 入射エネルギーで補正されている. その為, 現状では, 色収差補正の効果は, 加速と共に減衰する. 測定結果も, 正しくそのような状況を示しており, 計算結果とも良く一致した.

加速パターンボトム及び加速過程の光学系の調整・確認後に, 入射軌道と閉軌道のマッチングを確認した. 図12に181 MeV周回モードでの調整結果を示したが, 加速モードへ移行後も, そのマッチングは良く維持されていた.

5.2 ビーム損失の電流依存性・25 Hz 運転

以上の調整手順を経て, 我々は, ビーム損失の電流依存性を観測した (図21). 光学系の調整等の基本的

な調整・試験は、全て、 $(Q_x, Q_y) = (6.64, 6.25)$ で行ったが、チューンサーベイの結果、直ぐ下の $Q_y = 6.2$ 近傍に想定外の非常に強いビーム損失ポイントが確認された為、本測定は、 $(6.35, 6.47)$ という、高電流ビームに対しより安定な領域を選択し実施された (図 15 の○)。測定条件は、COD 補正・色収差補正有り、入射は中心入射 (ペイント無し)、 $h=2$ の 1 バンチで、徐々にバンチあたりの粒子数を増やしていった。

図に示されるように、 $3.8 \times 10^{11}/\text{bunch}$ という設計値の 1% 以下の低電流ビームでは、出射までだらだらとビーム損失が続いている。上述の通り、このオペレーティングポイントは、高電流ビームに適した点であり、空間電荷効果によるチューンの落ち込みや、現状のトラッキング誤差によるチューン変動を考慮し、 $Q_y = 6.47$ という際どい点が選択されている。即ち、チューンを別の位置に選べば、そのだらだらという損失は無くなる。

この測定で、最も粒子を詰め込んだ $4.4 \times 10^{12}/\text{bunch}$ という値は、バンチあたりの粒子数でいえば設計値の 1 割強に相当する。現状は、ペイント無しの中心入射なので、空間電荷的にはより厳しい状況で、その影響も有意になる領域である。ビーム損失率は 6.5%、その殆どが入射エネルギー近傍のビーム損失である。このビーム条件で、我々は、繰り返しとしては設計値である 25 Hz 運転を実施した。ビームの行先である 3N ダンプの許容値が 4 kW なので、数分という短い運転であったが、52 kW 出力という実績を残すことが出来た。ビーム損失パワーは 0.2 kW 程度であったが、ビーム損失モニタの出力やラン終了後実施した残留線量測定の結果から、ビーム損失の殆ど

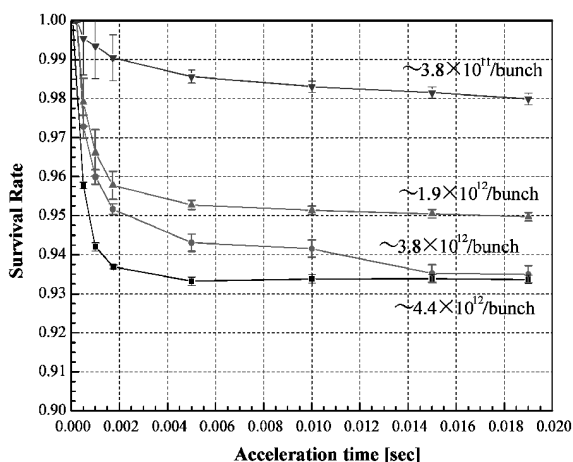


図 21 $(Q_x, Q_y) = (6.35, 6.47)$ で測定したビーム損失の電流依存性

が、コリメータシステムでしっかりと局所化されていることが確認された。我々のコリメータシステムの許容値は現状 4 kW である。

5.3 加速電圧への 2 倍高調波重畳試験

序論で述べたように、空間電荷の影響を緩和する為に、我々は、横方向及び縦方向のペインティング入射を行う。縦方向のペインティングでは、入射期間中の偏向電磁石の磁場変化や RF 周波数パターンを活用し、位相平面の広い範囲に粒子を分布させて縦方向の空間電荷密度を制御する目論見であるが、その際、加速電圧へ 2 倍高調波を重畳し、位相振動のポテンシャル形状を平坦化することで更なる効果を狙っている。ペインティング入射の本格的試験・調整は、本年の 5 月以降のランで計画しているが、その前試験として、第一ステージ最後の 2 月のランで、2 倍高調波の重畳試験を行った。その際の入射ビームの条件は、ピーク電流 22 mA、マクロパルス長 0.12 msec、中間バンチ長 560 nsec で、バンチあたりの粒子数としては、設計値の 1 割強という空間電荷の影響が有意になる領域である。

図 22 に、ウォールカレントモニタで観測した縦方

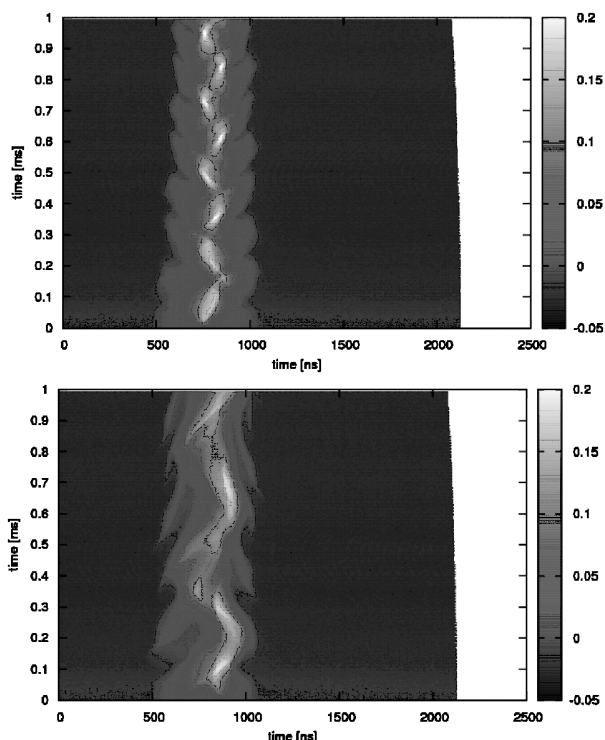


図 22 ウォールカレントモニタで観測した縦方向のビームプロファイルマウンテンプロット。上図は基本波のみ、下図は基本波の 50% の振幅を持つ 2 倍高調波を重畳し、更に、運動量 0.1% のオフセット入射を行った場合の結果

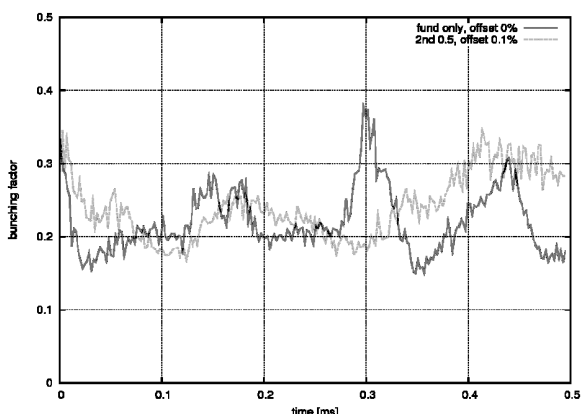


図23 バンチングファクター. 実線は基本波のみ, 点線は2倍高調波の重畳とオフセット入射を行った場合の結果

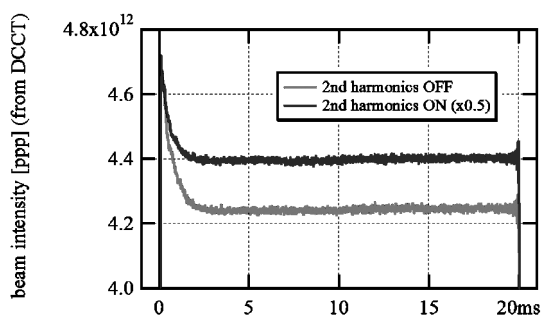


図24 DCCT シグナルより見積もった加速過程のビーム強度. 2倍高調波の重畳とオフセット入射により, 入射領域近傍のビーム損失が軽減された

向のプロファイルマウンテンプロットを示す. 上図は, 基本波のみの場合, 下図は, 入射から2 msec 迄, 基本波の半分の振幅を持つ2倍高調波を重畳し, 更に, 運動量方向に0.1%のオフセット入射を行った場合の結果になる. 上図に示されるように, 基本波のみの場合は, 四極振動による密度の濃淡が顕著に表れているが, 下図では, 2倍高調波による非線形な効果でピーク電流が下がっているのがわかる. 図23に, それぞれの場合のバンチングファクター(平均電流/ピーク電流)を示すが, 同様の効果が確認できる. 特に, 入射終了直後の空間電荷の影響が顕著になる領域(0から0.1 msec)で, バンチングファクターが改善されており, 図24に示すように, その領域のビーム損失が軽減されることも実証された.

先に述べたように, 今回用いた入射ビームのマクロパルス長は0.12 msecと短く, 位相平面の広い範囲に粒子を一様に分布させるという効果はまだ十分には得

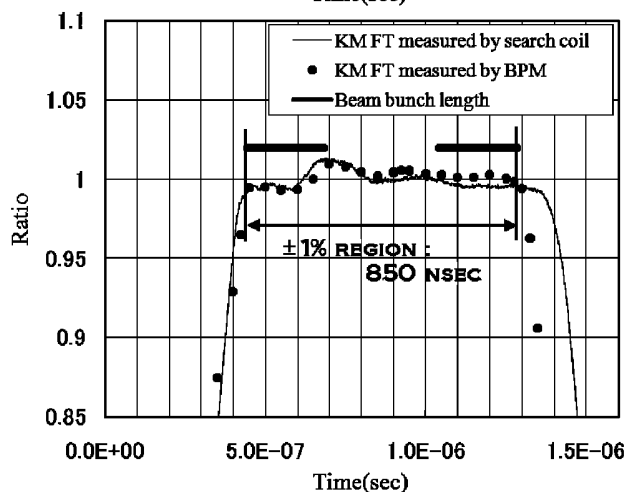
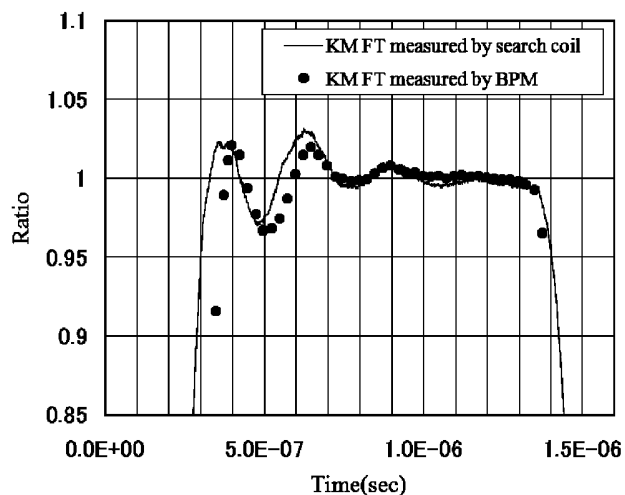


図25 取り出しキッカーのフラットトップ波形. 実線が磁場測定結果, ●がビームの軌道変位から見積もった結果. 上図がタイミング調整前, 下図が調整後

られていない. 5月以降のランでは, バンチあたりの粒子数でいえば, 今回とほぼ同じであるが, ピーク電流を5 mAに下げ, マクロパルス長を0.5 msecまで伸ばしたビームを用い, 設計通りのペイント時間を確保した試験を行う予定である.

5.4 キッカータイミング調整・2バンチ運転試験

今回のビーム試験期間では, 不要なビームロスを避ける為に, 殆どの試験・調整をh=2の1バンチ運転で行ったが, 最後に, h=2の2バンチという設計通りの運転試験を実施した.

RCSでのビーム取り出しは, 8台のキッカーシステムで行われる. 図25の上図の実線が, サーチコイルで測定したキッカーのフラットトップ波形になるが, 現状, 各キッカーの波形の平坦度は, ±3%程度であった. この効果は, 下流の出射セパタム出口で±10 mm程度の軌道変化に相当し, 取り出しビームの

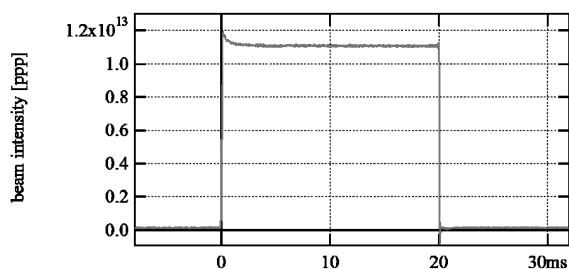


図26 DCCT シグナルより見積もった $h=2$ の 2 バンチ運転時の加速過程のビーム強度. 入射ビームの条件は, ピーク電流 22 mA, マクロパルス長 0.12 msec, 中間バンチ長 700 nsec. 出射時のパルスあたりの粒子数は, 1.1×10^{13} . 5.3 で述べた 2 倍高調波の重畳とオフセット入射実施時の結果 (横方向ペイントは無し)

エミッタンス増大につながる. 1 バンチ運転の際は, 平坦度の良い場所にビームを乗せていたが, 2 バンチ運転の際は, このままでは, 前方のバンチが丁度リングの上に乗ってしまうことになる. そこで, 我々は, 2 バンチ運転試験の前に, 各キッカータイミングを調整し, リングを相殺させる調整を行った.

図 25 の上図に, キッカー全 8 台を同じタイミングで立ち上げた場合のフラットトップ波形の測定結果を示す. この結果は, 取り出し時のバンチ長が 30 nsec 程度の短バンチビームを用い, キッカーの立ち上げタイミングをスキャンして, 下流の BPM で測定した軌道の変位量から見積もったものである. 図に示されるように, 磁場測定の結果と, ビームを使った測定は良く一致しており, この場合の平坦度は, 先に述べたように $\pm 3\%$ 程度, リングの山と谷の間隔は 100 nsec 程度であった. 図 25 の下図に, 奇数番目のキッカーと偶数番目のキッカーのタイミングを 100 nsec 程度ずらした場合の同様の測定結果を示す. 図に示される通り, 山と谷が上手く相殺され, フラットトップの平坦度を $\pm 1\%$ という要求値の範囲に収めることができた. ビームを使った観測結果では, この場合のフラットトップ長は, 850 nsec 程度で, 最終設計での最も厳しい要求値 841 nsec に対し殆ど余裕のない状況である. 但し, 図中に示される磁場測定結果から予想される波形のフラットトップは 950 nsec 程度あるので, 今後, 詳細なタイミング調整により, $\pm 1\%$ という平坦度を保持したまま, その程度までフラットトップ長を伸ばせるものと期待している.

上述のタイミング調整後のキッカー波形を用い, $h=2$ の 2 バンチ運転を実施した. 最も粒子を詰め込んだ時の入射ビームの条件は, ピーク電流 22 mA, マ

クロパルス長 0.12 msec, 中間バンチ長 700 nsec で, 出射時のパルスあたりの粒子数は, 1.1×10^{13} という設計値の 13% というビームであったが, 出射時に有意なビーム損失は観測されなかった. 図 26 に, DCCT シグナルより見積もった, その時のビーム強度を示す. ビーム損失率は 6% 程度で, その殆どは入射エネルギー領域での損失である. この試験は, シングルショットで行ったが, 25 Hz 運転を想定した場合のビーム損失パワーは, 0.47 kW に相当する. これが, 現状, 我々が達成している最大瞬間出力である.

6. 今後の方針・課題

今後は, いよいよ, 大強度ビームの加速という次のステージに足を踏み入れることになる. その際, ビーム損失の更なる低減が大きな研究課題になるが, 大きな鍵を握るのが, 横・縦方向のペイント入射である. 我々は, その試験を本年 5 月以降のランで計画しているが, まずは, 中心入射とペイント入射時でのビーム損失の電流依存性を観測し, ペイント入射の効果を実証したいと考えている. その後は, オペレーティングポイントや加速中のチューン変化等の最適化と共にペイント入射の調整を進め, ビーム損失の軽減を試みることになる.

また, 今後は, ビームを供給する立場から, 横方向や縦方向のプロファイルなどビームの質も, ビーム電流増強時の重要な評価対象になる. 即ち, より詳細で高精度な調整を目指すことになるが, 軌道の絶対精度の向上や, ビームハローの測定・評価手法の確立等が必要な段階になる.

また, 今後, 問題になるビーム損失のソースとして, 荷電変換膜での散乱が挙げられる. 設計通りの横方向ペイント入射, 即ち, 入射バンパ軌道の立ち下げ時間を速く (0.185 msec 以下) 出来れば, 荷電変換膜とビームの平均衝突回数は 20 回程度であり, 生じるビーム損失も 0.2% 程度と評価されている⁸⁾. しかしながら, 入射バンパ軌道を作る電磁石の電源に使用されているスイッチング素子のノイズが原因で, セラミックダクトの RF シールド用のコンデンサが破壊されるというトラブルがあった為に, 現状は, コンデンサを可能な限り撤去し, また, 入射バンパの立ち下げ時間を伸ばして (0.5 msec) ノイズの影響を軽減するといった応急処置でビーム試験を進めている. 現状のままでは, 荷電変換膜との衝突回数は 100 回を超え, 入射時に数%程度のビーム損失が発生する可能性がある. 今後, ノイズの軽減と高耐圧コンデンサへの交換が必要になる.

現在、RCS には、計 10 台の加速空洞が設置されているが、もともとの設計では、マージンも含め 11 台設置予定であった。今後、ビーム電流を上げると、ビームローディングの影響も現われてくるので、高強度、且つ、安定な運転を実現するには、最低もう一台の加速空洞の追加が必要と考えている。

今後、50 kW, 100 kW と順次、高出力を目指すことになるが、入射エネルギーが 181 MeV である間の我々の当面の最大目標は、0.3 MW 出力を実現することである。この運転と、我々の最終目標である 400 MeV の入射エネルギーで 1 MW 出力という運転では、入射エネルギー領域での空間電荷の影響が、ほぼ同等になる。即ち、その 0.3 MW 出力運転時のビーム損失を出来る限り軽減し、且つ、ビームの質を改善する為の調整が、その後の 1 MW 出力という我々の最終目標に繋がることになる。大出力、且つ、低ビーム損失、更には、ビームの質も考慮した運転を実現するには、今後、色々な困難が立ちはだかると思われるが、その都度、必要に応じ、補正手段を検討し、場合によっては、機器の性能強化や、新たな補正機器やモニタ系の導入が必要になる可能性もあるが、兎も角、一步一步地道な努力を継続することが重要になる。当然ながら設計性能を実現するにはある程度の年月が必要になる。

7. ま と め

J-PARC 3 GeV RCS は、2007 年 9 月よりビームコミッショニングを開始し、2008 年 2 月末迄、RCS 主体のビーム試験を継続した。この期間に、加速器としての基本的なチューニングや基礎データの収集等を一通り行い、本年 5 月より開始予定の MR 及び中性子・ミュオン標的のビームコミッショニングに必要なビーム条件を確保すると共に、大強度ビーム加速に向けた前試験も幾つか実施することが出来た。この期間中、リニアックからの入射ビームは、軌道・エネルギー共に非常に安定であり、また、RCS の構成機器も比較的安定に運転されていたので、ビーム調整を着実に進めることが出来た。また、モニタ系の立ち上げ調整も予想以上に順調に進んだことや、また、ビームコミッショニング開始前にデータ解析ソフトの整備に

も時間を割いたおかげで、ビーム試験開始直後から、ほぼ当初のシナリオ通りの運転調整が出来た。この第一ステージの試験期間における所期目標は、ほぼ達成できたと思っている。

謝辞

J-PARC 3 GeV RCS のビームコミッショニングは、RCS グループメンバーを中心に、リニアックグループ、MR グループ、安全グループや運転業務を委託された企業の方々など、多くの方々のご支援を受けて行われています。また、予定通りビームを出し、ここまで順調にビーム試験が進められている事実は、長い歳月をかけて行われてきた RCS の設計、製作、各種試験に参加されたメーカーの皆さんなど、多くの方々の努力を反映するものです。ここに、深い感謝の意を表します。最後に、2005 年 3 月迄、RCS グループのリーダーとして、我々をご指導頂いた KEK の故木代純逸教授に、この場をお借りして、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Y. Yamazaki ed., "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC", KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- 2) M. Ikegami, "Beam Commissioning of J-PARC Linac", *J. Particle Accelerator Society of Japan*, 4(2), pp. 99-111, (2007).
- 3) M. Yoshimoto *et al.*, "Present Status of Injection and Extraction System of 3 GeV-RCS at J-PARC", Proc. of EPAC 2006, p. 1765, 2006.
- 4) K. Yamamoto *et al.*, "Present Status of Beam Collimation System of J-PARC RCS", Proc. of EPAC 2006, p. 3200, 2006.
- 5) M. Yoshii *et al.*, "Present Status of J-PARC Ring RF Systems", Proc. of PAC 2007, p. 1511, 2007.
- 6) H. Hotchi *et al.*, "Effects of Intrinsic Nonlinear Fields in the J-PARC RCS", Proc. of EPAC 2006, p. 2104, 2006.
- 7) H. Hotchi *et al.*, "Effects of Magnetic Field Tracking Errors on Beam Dynamics at J-PARC RCS", Proc. of PAC 2007, p. 4078, 2007.
- 8) P. K. Saha *et al.*, "Updated Simulation for the Nuclear Scattering Loss Estimation at the RCS Injection Area", Proc. of PAC 2007, p. 1526, 2007.